

# Windkraftanlagen

Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit

Bearbeitet von  
Erich Hau

5., neu bearbeitete Auflage 2014. Buch. XXII, 969 S. Hardcover  
ISBN 978 3 642 28876 0  
Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beek-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Häufig verwendete Symbole</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Windmühlen und Windräder</b>	<b>1</b>
1.1 Über die Ursprünge der Windmühlen . . . . .	1
1.2 Europäische Windmühlentypen . . . . .	4
1.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Windmühlen . . . . .	12
1.4 Wissenschaft und technische Entwicklung im Windmühlenbau . . . . .	14
1.5 Die amerikanische Windturbine . . . . .	18
Literatur . . . . .	22
<b>2 Strom aus Wind – Die ersten Versuche</b>	<b>23</b>
2.1 Poul La Cour – Ein Pionier in Dänemark . . . . .	23
2.2 Windkraftwerke – Große Pläne in Deutschland . . . . .	29
2.3 1250 kW aus dem Wind – Die erste Großanlage in den USA . . . . .	33
2.4 Windkraftanlagen in den 50er Jahren – Vor der Energiekrise . . . . .	36
2.5 Nach der Energiekrise – Aufbruch in die moderne Windenergienutzung . . . . .	44
2.6 Die großen Versuchsanlagen der 80er Jahre . . . . .	47
2.7 Der erste Erfolg der kleinen Windkraftanlagen in Dänemark . . . . .	57
2.8 Die amerikanischen Windfarmen . . . . .	59
Literatur . . . . .	64
<b>3 Bauformen von Windkraftanlagen</b>	<b>67</b>
3.1 Rotoren mit vertikaler Drehachse . . . . .	68
3.2 Horizontalachsen-Rotoren . . . . .	71
3.3 Windenergie-Konzentratoren . . . . .	74
3.4 Begriffe und Bezeichnungen . . . . .	79
Literatur . . . . .	80
<b>4 Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung</b>	<b>81</b>
4.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz . . . . .	81
4.2 Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergieumwandler . . . . .	86
Literatur . . . . .	90

<b>5</b>	<b>Aerodynamik des Rotors</b>	<b>91</b>
5.1	Physikalisch-mathematische Modelle und Verfahren	92
5.1.1	Blattelementtheorie	93
5.1.2	Wirbelmodell der Rotorströmung	98
5.1.3	Numerische Strömungssimulation	100
5.1.4	Rotornachlaufströmung	102
5.2	Leistungscharakteristik des Rotors	106
5.2.1	Rotorleistungskennfeld und Drehmomentenkennfeld	106
5.2.2	Leistungscharakteristiken verschiedener Rotorbauarten	108
5.3	Aerodynamische Leistungsregelung	110
5.3.1	Blatteinstellwinkelregelung	111
5.3.2	Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung (Stall)	116
5.3.3	Aktive Steuerung der Strömungsablösung	121
5.3.4	Instationäre Effekte und Grenzschichtbeeinflussung	122
5.3.5	Aus dem Wind drehen	125
5.4	Das aerodynamische Profil	126
5.4.1	Charakteristische Eigenschaften	126
5.4.2	Profilgeometrie und Systematik	129
5.4.3	Laminarprofile	134
5.4.4	Einflußauf den Rotorleistungsbeiwert	138
5.5	Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik	140
5.5.1	Anzahl der Rotorblätter	140
5.5.2	Optimale Form des Blattumrisses	142
5.5.3	Verwindung der Rotorblätter	148
5.5.4	Blattdicke	150
5.5.5	Auslegungsschnellaufzahl	151
5.6	Ausgeführte Rotorblätter	154
5.7	Windrichtungsnachführung des Rotors	157
5.8	Aerodynamik der Vertikalachsen-Rotoren	161
5.9	Experimentelle Rotor-aerodynamik	166
5.9.1	Modellmessungen im Windkanal	166
5.9.2	Messungen an Originalanlagen	169
	Literatur	171
<b>6</b>	<b>Belastungen und Strukturbeanspruchungen</b>	<b>173</b>
6.1	Belastungsarten und ihre Wirkung auf die Windkraftanlage	174
6.2	Koordinatensysteme und Bezeichnungen	176
6.3	Ursachen der Belastungen	177
6.3.1	Eigengewicht, Zentrifugal- und Kreiselkräfte	178
6.3.2	Gleichförmige, stationäre Rotoranströmung	179
6.3.3	Höhenprofil der Windgeschwindigkeit	183
6.3.4	Schräganströmung des Rotors	184
6.3.5	Turbumströmung	185
6.3.6	Windturbulenz und Böen	190
6.4	Lastannahmen	194

6.4.1	Internationale und nationale Normen . . . . .	195
6.4.2	Klassifizierung der Windkraftanlagen und Windzonen . . . . .	198
6.4.3	Normale Windbedingungen . . . . .	200
6.4.4	Extreme Windbedingungen . . . . .	200
6.4.5	Andere Umwelteinflüsse . . . . .	202
6.4.6	Sonstige externe Bedingungen . . . . .	203
6.4.7	Sicherheitsfaktoren . . . . .	204
6.5	Maschinenstatus und Lastfälle . . . . .	205
6.5.1	Normaler Betrieb . . . . .	206
6.5.2	Technische Störungen . . . . .	208
6.6	Strukturbeanspruchung und Dimensionierung . . . . .	210
6.6.1	Beanspruchungsarten . . . . .	210
6.6.2	Lastkollektive . . . . .	212
6.7	Strukturdynamik . . . . .	215
6.7.1	Mathematische Modellierung der Windkraftanlage . . . . .	215
6.7.2	Modellierung der Windturbulenz . . . . .	216
6.7.3	Analytische Ansätze und numerische Simulation . . . . .	220
6.8	Konzeptmerkmale und Strukturbeanspruchungen . . . . .	223
6.8.1	Anzahl der Rotorblätter . . . . .	223
6.8.2	Rotornabengelenke beim Zweiblattrotor . . . . .	225
6.8.3	Steifigkeit der Rotorblätter . . . . .	228
6.8.4	Regelungssystem . . . . .	229
6.8.5	Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise . . . . .	232
6.9	Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchungen . . . . .	235
6.9.1	Prüfstandversuche mit Rotorblättern . . . . .	236
6.9.2	Datenerfassungssysteme und Messungen an Originalanlagen . . . . .	237
Literatur . . . . .		240
<b>7</b>	<b>Schwingungsverhalten</b> . . . . .	<b>243</b>
7.1	Anregenden Kräfte und Schwingungsfreiheitsgrade . . . . .	244
7.2	Aeroelastisches Verhalten der Rotorblätter . . . . .	246
7.2.1	Statische Divergenz . . . . .	247
7.2.2	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen . . . . .	248
7.2.3	Typische Rotorblattschwingungen . . . . .	250
7.3	Torsionsschwingungen des Triebstrangs . . . . .	252
7.3.1	Mechanisches Ersatzmodell . . . . .	253
7.3.2	Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung . . . . .	256
7.3.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen . . . . .	257
7.3.4	Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .	260
7.4	Dynamik der Windrichtungsnachführung . . . . .	262
7.4.1	Mechanisches Modell und Momente um die Hochachse . . . . .	263
7.4.2	Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .	265
7.5	Schwingungen der Gesamtanlage . . . . .	267
7.5.1	Turmsteifigkeit . . . . .	267
7.5.2	Resonanzdiagramme ausgeführter Anlagen . . . . .	269

7.6	Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens . . . . .	275
	Literatur . . . . .	278
<b>8</b>	<b>Rotorblätter</b>	<b>281</b>
8.1	Materialfragen . . . . .	282
8.2	Vorbild: Flugzeugtragflügel . . . . .	284
8.3	Frühere experimentelle Bauweisen von Rotorblättern . . . . .	287
8.3.1	Genietete Aluminiumkonstruktionen . . . . .	287
8.3.2	Stahlbauweisen . . . . .	289
8.3.3	Traditionelle Holzbauweise . . . . .	293
8.3.4	Ältere Faserverbundbauweisen . . . . .	294
8.3.5	Holz-Epoxid-Verbundbauweise . . . . .	299
8.4	Moderne Rotorblätter in Faserverbundtechnik . . . . .	300
8.4.1	Faserverbund-Technologie . . . . .	300
8.4.2	Konstruktive Auslegung der Rotorblätter . . . . .	302
8.4.3	Fertigungsverfahren . . . . .	303
8.5	Blattanschlüssen die Rotornabe . . . . .	307
8.6	Rotorblattbauweisen im Vergleich . . . . .	311
8.7	Aerodynamische Bremsklappen . . . . .	315
8.8	Blitzschutz . . . . .	316
8.9	Enteisung . . . . .	317
	Literatur . . . . .	318
<b>9</b>	<b>Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus</b>	<b>321</b>
9.1	Grundsätzliche Überlegung zur Leistungsübertragung . . . . .	322
9.2	Triebstrang mit Übersetzungsgetriebe . . . . .	325
9.2.1	Experimentelle Konzeptionen . . . . .	325
9.2.2	Heutige Bauweisen mit schnellaufendem Generator . . . . .	327
9.2.3	Mittelschnellaufende Triebstrangauslegung . . . . .	331
9.3	Getriebelose Bauart . . . . .	333
9.3.1	Ringgenerator mit elektrischer Erregung . . . . .	333
9.3.2	Permanentmagnet-Generator . . . . .	334
9.4	Triebstrangkonzeptionen im Vergleich . . . . .	335
9.4.1	Triebstrangkonzepktion und Baumasse . . . . .	335
9.4.2	Perspektiven bei zunehmender Anlagengröße . . . . .	338
9.5	Rotornabe . . . . .	342
9.5.1	Ältere Nabenbauarten . . . . .	342
9.5.2	Gegossene Rotornaben für Dreiblattrotoren . . . . .	344
9.5.3	Rotornabenbauarten für Zweiblattrotoren . . . . .	345
9.6	Blattverstellmechanismus . . . . .	349
9.6.1	Rotorblattlagerung . . . . .	351
9.6.2	Blattverstellsysteme mit hydraulischem Antrieb . . . . .	353
9.6.3	Elektromotorische Blattverstellung . . . . .	358
9.6.4	Passive Blattverstellung . . . . .	360
9.6.5	Redundanz- und Sicherheitsfragen . . . . .	361

9.7	Rotorlagerung . . . . .	363
9.7.1	Lagerprobleme . . . . .	364
9.7.2	Rotorwelle mit separaten Lagern . . . . .	366
9.7.3	Dreipunkt-Lagerung von Rotorwelle und Getriebe . . . . .	368
9.7.4	„Einlager“-Konzeption . . . . .	369
9.7.5	Rotorlagerung auf einer feststehenden Achse . . . . .	371
9.8	Rotorbremse . . . . .	373
9.9	Übersetzungsgetriebe . . . . .	376
9.9.1	Getriebebauarten . . . . .	376
9.9.2	Äußere Belastungsvorgaben für die Getriebeauslegung . . . . .	380
9.9.3	Innere Getriebedimensionierung und konstruktive Auslegung . . . . .	383
9.9.4	Wirkungsgrad und Geräuscentwicklung . . . . .	384
9.10	Drehzahlvariable Überlagerungsgetriebe . . . . .	387
9.11	Torsionselastizität im mechanischen Triebstrang . . . . .	389
9.12	Einbau des elektrischen Generators . . . . .	392
9.13	Maschinenhaus . . . . .	395
9.13.1	Bauweise und statische Konzeption . . . . .	395
9.13.2	Hilfsaggregate und sonstige Einbauten . . . . .	397
9.13.3	Äußere Form – ästhetische Gesichtspunkte . . . . .	401
9.14	Windrichtungsnachführung . . . . .	404
9.15	Funktionsprüfung und Serienfertigung . . . . .	408
	Literatur . . . . .	410
<b>10</b>	<b>Elektrisches System</b> . . . . .	<b>411</b>
10.1	Generatorbauarten . . . . .	412
10.1.1	Synchrongenerator . . . . .	412
10.1.2	Asynchrongenerator . . . . .	416
10.1.3	Permanentmagnet-Generatoren . . . . .	420
10.2	Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren in Windkraftanlagen . . . . .	422
10.3	Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung . . . . .	425
10.3.1	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung . . . . .	426
10.3.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung . . . . .	427
10.3.3	Asynchrongenerator mit variablem Schlupf . . . . .	429
10.3.4	Drehzahlgestufte Generatorsysteme . . . . .	430
10.4	Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter . . . . .	432
10.4.1	Frequenzumrichter . . . . .	433
10.4.2	Generator mit Vollumrichter . . . . .	436
10.4.3	Asynchrongenerator mit übersynchroner Stromrichter-kaskade . . . . .	438
10.4.4	Doppeltgespeister Asynchrongenerator . . . . .	439
10.5	Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatoren . . . . .	442
10.5.1	Synchrongenerator mit elektrischer Erregung . . . . .	442
10.5.2	Generator mit Permanentmagnet-Erregung . . . . .	446
10.6	Elektrische Gesamtausrüstung der Windkraftanlage . . . . .	450
10.6.1	Große Anlagen . . . . .	450

10.6.2	Kleine und mittlere Anlagen . . . . .	452
10.7	Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich . . . . .	454
	Literatur . . . . .	456
<b>11</b>	<b>Regelung und Betriebsführung</b>	<b>459</b>
11.1	Betriebsdatenerfassung . . . . .	462
11.1.1	Betriebswindmeßsystem . . . . .	463
11.1.2	Elektrische Leistungsmessung . . . . .	465
11.1.3	Sonstige Betriebsdaten . . . . .	466
11.2	Technologie und Charakteristik der Regler . . . . .	467
11.3	Windrichtungsnachführung . . . . .	469
11.4	Leistungsregelung mit Blatteinstellwinkelregelung . . . . .	471
11.4.1	Mathematische Modellierung . . . . .	471
11.4.2	Drehzahlfeste Generatoren im Netzparallelbetrieb . . . . .	474
11.4.3	Netzparallelbetrieb mit drehzahlvariablen Generatorsystemen . . . . .	479
11.4.4	Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz . . . . .	481
11.5	Leistungsbegrenzung durch den aerodynamischen Stall . . . . .	483
11.5.1	Netzparallelbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel . . . . .	483
11.5.2	Inselbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel . . . . .	484
11.5.3	Stall-Regelung mit verstellbarem Blatteinstellwinkel . . . . .	485
11.6	Betriebszyklus und Sicherheitssystem . . . . .	488
11.6.1	Betriebszustände . . . . .	489
11.6.2	Sicherheitssystem . . . . .	491
11.7	Bauliche Realisierung des Regelungssystems . . . . .	492
11.8	Zusammenwirken mit dem Stromnetz . . . . .	494
	Literatur . . . . .	497
<b>12</b>	<b>Turm und Fundament</b>	<b>499</b>
12.1	Turmbauarten und Varianten . . . . .	500
12.2	Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen . . . . .	505
12.3	Turmauslegung nach deutschen Bauvorschriften . . . . .	506
12.4	Freitragende Stahlrohrtürme . . . . .	507
12.4.1	Steifigkeit und Baumasse . . . . .	508
12.4.2	Konstruktion und Fertigungstechnik . . . . .	510
12.4.3	Aufstiegshilfen und Einbauten . . . . .	514
12.5	Gittertürme . . . . .	517
12.6	Betontürme . . . . .	520
12.6.1	Ortbeton-Bauweise . . . . .	521
12.6.2	Beton-Fertigteilmbauweise . . . . .	522
12.7	Beton/Stahl-Hybridtürme . . . . .	524
12.8	Turm-Konzeptionen im Vergleich . . . . .	527
12.9	Optimale Turmhöhe . . . . .	529
12.10	Fundament . . . . .	532
12.10.1	Dimensionierende Lasten und Bodenbeschaffenheit . . . . .	532
12.10.2	Fundamentbauarten . . . . .	533

12.10.3	Einbindung des Turmes im Fundament . . . . .	534
12.10.4	Typische Ausführungsbeispiele . . . . .	536
Literatur . . . . .		538
<b>13</b>	<b>Windverhältnisse</b>	<b>539</b>
13.1	Ursachen des Windes und Energieinhalt . . . . .	539
13.2	Globale Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten . . . . .	542
13.3	Windverhältnisse in Europa und in Deutschland . . . . .	549
13.4	Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten . . . . .	553
13.4.1	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten . . . . .	553
13.4.2	Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe . . . . .	556
13.4.3	Stetigkeit des Windes . . . . .	559
13.4.4	Windturbulenz und Böen . . . . .	566
13.5	Lokale Windverhältnisse – Topographie und Hindernisse . . . . .	568
13.6	Ermittlung der Windgeschwindigkeit . . . . .	570
13.6.1	Messungen mit Anemometern und stationärem Windmeßmast . . . . .	572
13.6.2	SODAR und LIDAR . . . . .	576
13.6.3	Ermittlung der Winddaten und der Energielieferung nach dem Europäischen Windatlas . . . . .	577
13.6.4	Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen Windfeldern . . . . .	580
13.6.5	Über das Windenergiepotential . . . . .	582
Literatur . . . . .		587
<b>14</b>	<b>Leistung und Energielieferung</b>	<b>589</b>
14.1	Vom Rotorleistungskennfeld zur effektiven Anlagenleistung . . . . .	590
14.1.1	Installierte Generatorleistung und Rotordrehzahl . . . . .	590
14.1.2	Leistungsverluste durch Regelung und Betriebsführung . . . . .	595
14.1.3	Verluste im mechanisch-elektrischen Triebstrang . . . . .	596
14.1.4	Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen . . . . .	599
14.2	Leistungskennlinie . . . . .	601
14.2.1	Normierte Leistungskennlinie . . . . .	601
14.2.2	Vermessung der Leistungskennlinie . . . . .	603
14.3	Aufstellortbezogene Einflüsse auf die Leistungskennlinie . . . . .	609
14.3.1	Schwieriges Gelände . . . . .	609
14.3.2	Luftdichte . . . . .	610
14.3.3	Turbulenz . . . . .	613
14.3.4	Sonstige wetterbedingte Einflüsse . . . . .	615
14.3.5	Verschmutzung und Abnutzung der Rotorblätter . . . . .	615
14.3.6	Schallreduzierter Betrieb . . . . .	616
14.4	Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe . . . . .	618
14.5	Jahresenergielieferung . . . . .	620
14.5.1	Berechnungsverfahren . . . . .	620
14.5.2	Näherungsweise Ermittlung der Energielieferung . . . . .	622

14.5.3	Sensitivität bezüglich der Winddaten . . . . .	625
14.5.4	Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor . . . . .	626
14.5.5	Energielieferungsprognosen für Projektfinanzierungen . . . . .	630
14.6	Wichtige Entwurfsparameter und Energielieferung . . . . .	631
14.6.1	Anlagen-Leistungsbeiwert . . . . .	632
14.6.2	Rotordurchmesser . . . . .	633
14.6.3	Optimale Rotordrehzahl und Drehzahlvariabilität . . . . .	635
14.6.4	Leistungsregelung . . . . .	638
14.6.5	Installierte Generatorleistung . . . . .	639
14.6.6	Nabenhöhe des Rotors . . . . .	641
14.6.7	Betriebswindgeschwindigkeitsbereich . . . . .	642
14.6.8	Die Windkraftanlage als Energiewandler — eine grundsätzliche Betrachtung . . . . .	643
	Literatur . . . . .	644
<b>15</b>	<b>Umweltverhalten</b>	<b>647</b>
15.1	Gefahren für die Umgebung . . . . .	648
15.1.1	Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen? . . . . .	648
15.1.2	Risikobetrachtungen . . . . .	651
15.2	Schallemissionen . . . . .	652
15.2.1	Akustische Kenngrößen und zulässige Immissionswerte . . . . .	652
15.2.2	Geräuschquellen bei Windkraftanlagen . . . . .	653
15.2.3	Schalleistungspegel . . . . .	657
15.2.4	Schallausbreitung . . . . .	660
15.3	Schattenwurf . . . . .	664
15.4	Störungen von Funk und Fernsehen . . . . .	667
15.5	Störungen der Vogelwelt . . . . .	669
15.6	Landverbrauch . . . . .	670
15.7	Optische Beeinträchtigung der Landschaft . . . . .	673
15.8	Windenergienutzung und Klimaschutz . . . . .	674
15.8.1	Einflußauf das Umgebungsklima . . . . .	674
15.8.2	Nutzung der Windkraft und CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	676
	Literatur . . . . .	678
<b>16</b>	<b>Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche</b>	<b>681</b>
16.1	Windkraftanlagen im Inselbetrieb . . . . .	682
16.1.1	Autonome Stromversorgung mit Windenergie – die Speicherpro- blematik . . . . .	683
16.1.2	Heizen mit Windenergie . . . . .	689
16.1.3	Wasserpumpen . . . . .	692
16.1.4	Entsalzen von Meerwasser . . . . .	695
16.2	Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen . . . . .	698
16.3	Windkraftanlagen im Verbund mit dem Stromnetz . . . . .	702
16.3.1	Einzelanlagen im Netzparallelbetrieb . . . . .	703
16.3.2	Windfarmen und Windparks . . . . .	704

16.4	Windkraftanlagen im Kraftwerksverbund . . . . .	708
16.4.1	Die Regelungsproblematik . . . . .	709
16.4.2	Das Verbundnetz . . . . .	711
16.4.3	Beitrag zur gesicherten Leistung . . . . .	713
16.5	Windkraftanlagenindustrie und Absatzmärkte . . . . .	714
16.5.1	Historische Entwicklung der Absatzmärkte . . . . .	715
16.5.2	Die Windkraftanlagenhersteller . . . . .	717
16.5.3	Zuliefererindustrie und Dienstleistungsunternehmen . . . . .	720
Literatur	. . . . .	723
<b>17</b>	<b>Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere</b>	<b>725</b>
17.1	Technische Probleme der Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen . .	726
17.1.1	Technische Anforderungen an die Windkraftanlagen . . . . .	726
17.1.2	Gründung auf dem Meeresgrund . . . . .	729
17.1.3	Elektrische Konzeption . . . . .	738
17.2	Transport und Montage . . . . .	743
17.3	Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen . . . . .	746
17.3.1	Wetterbedingte Zugänglichkeit . . . . .	746
17.3.2	Wartung und Instandsetzung . . . . .	747
17.4	Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Nord- und Ostsee . . . . .	749
17.4.1	Ozeanographische Bedingungen und Windverhältnisse . . . . .	750
17.4.2	Völkerrechtliche Situation . . . . .	754
17.4.3	Kriterien für das Genehmigungsverfahren . . . . .	756
17.4.4	Die ersten Offshore-Windparks . . . . .	758
17.5	Offshore-Windenergie in Europa . . . . .	761
17.6	Strom aus der Nordsee für Deutschland . . . . .	766
17.7	Offshore-Projekte Weltweit . . . . .	769
Literatur	. . . . .	771
<b>18</b>	<b>Planung, Errichtung und Betrieb</b>	<b>773</b>
18.1	Projektentwicklung . . . . .	774
18.2	Genehmigungsverfahren . . . . .	776
18.2.1	Gesetze und Regelwerke . . . . .	776
18.2.2	Planerische Vorgaben der Gemeinden und regionalen Gremien . .	779
18.2.3	Genehmigung von Windkraftprojekten nach BImSchG . . . . .	780
18.2.4	Baugenehmigung für einzelne Anlagen . . . . .	783
18.3	Technische Auslegung von Windparks . . . . .	783
18.3.1	Aerodynamik der Feldaufstellung . . . . .	783
18.3.2	Interne elektrische Verkabelung und Stichleitung zum Netz . . . .	788
18.3.3	Netzanschluß . . . . .	793
18.4	Tiefbauarbeiten am Aufstellort . . . . .	798
18.5	Transportprobleme . . . . .	803
18.6	Errichtung am Aufstellort . . . . .	806
18.6.1	Standardverfahren . . . . .	807
18.6.2	Errichtung ohne schwere Hebezeuge . . . . .	812

18.6.3	Die Montage des Maschinenhauses am Aufstellort . . . . .	816
18.6.4	Große Experimentalanlagen mit Zweiblattrotor . . . . .	818
18.7	Inbetriebnahme . . . . .	823
18.7.1	Kommerzielle Anlagen und Windparks . . . . .	824
18.7.2	Versuchsanlagen und Prototypen . . . . .	825
18.8	Technische Betriebsführung . . . . .	826
18.8.1	Erfassung der Betriebsdaten . . . . .	827
18.8.2	Überwachung und Steuerung mit SCADA-Systemen . . . . .	830
18.8.3	Technische Zustandsüberwachung – Condition Monitoring . . . . .	832
18.9	Betriebssicherheit . . . . .	833
18.9.1	Technische Sicherheitssysteme . . . . .	834
18.9.2	Gefahren durch extreme Wetterlagen . . . . .	839
18.10	Wartung und Instandsetzung . . . . .	843
18.10.1	Reguläre Wartung . . . . .	845
18.10.2	Schadensursachen und Reparaturrisiken . . . . .	846
18.10.3	Statistische Auswertungen . . . . .	850
	Literatur . . . . .	851
<b>19</b>	<b>Kosten von Windkraftanlagen und Anwendungsprojekten</b>	<b>853</b>
19.1	Herstellkosten und Verkaufspreise von Windkraftanlagen . . . . .	854
19.1.1	Spezifische Kosten und Bezugsgrößen . . . . .	855
19.1.2	Die Baumasse als Grundlage zur Ermittlung der Herstellkosten . . . . .	857
19.1.3	Baumassen ausgeführter Windkraftanlagen . . . . .	862
19.1.4	Ermittlung der Herstellkosten mit massenbezogenen Kostenwerten . . . . .	865
19.1.5	Herstellkosten der heutigen Windkraftanlagen . . . . .	868
19.1.6	Konzeptionelle Merkmale und Herstellkosten . . . . .	874
19.1.7	Kostendegression in der Serienfertigung . . . . .	876
19.1.8	Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung . . . . .	878
19.1.9	Alternative technische Konzeptionen . . . . .	879
19.1.10	Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen . . . . .	881
19.1.11	Entwicklung der Verkaufspreise . . . . .	882
19.2	Investitionskosten von schlüsselfertigen Projekten . . . . .	885
19.2.1	Projektentwicklung . . . . .	885
19.2.2	Technische Infrastruktur . . . . .	886
19.2.3	Sonstige Kosten . . . . .	889
19.2.4	Typische Kostenbeispiele . . . . .	891
19.3	Betriebskosten . . . . .	894
19.3.1	Wartung und Instandsetzung . . . . .	895
19.3.2	Versicherungen . . . . .	897
19.3.3	Sonstige Betriebskosten . . . . .	898
19.3.4	Jährliche Betriebskosten . . . . .	899
19.4	Offshore-Projekte . . . . .	900
19.4.1	Bestimmende Faktoren für die Investitionskosten . . . . .	900
19.4.2	Entwicklung der Investitionskosten seit 1990 . . . . .	902
19.4.3	Typische Kostenbeispiele . . . . .	903

19.4.4 Betriebskosten . . . . .	906
19.4.5 Ausblick . . . . .	907
Literatur . . . . .	908
<b>20 Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Windenergie</b>	<b>909</b>
20.1 Unternehmensformen und Finanzierung . . . . .	910
20.2 Statische Berechnung der Stromerzeugungskosten . . . . .	913
20.2.1 Einzelne Anlagen und Windparks . . . . .	914
20.2.2 Offshore-Windparks . . . . .	919
20.3 Dynamische Berechnung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	921
20.3.1 Kapital- oder Barwertmethode . . . . .	922
20.3.2 Kapitalflußprognose für einen Windpark . . . . .	924
20.4 Stromerzeugungskosten aus Windenergie im Vergleich zu anderen Energiesystemen . . . . .	928
20.5 Energetische Amortisation von Windkraftanlagen . . . . .	931
20.6 Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung . . . . .	932
20.7 Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der erneuerbaren Energien . . . . .	933
Literatur . . . . .	935
<b>Glossar – englische Fachausdrücke</b>	<b>937</b>
Deutsch – Englisch . . . . .	937
Englisch – Deutsch . . . . .	948
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>959</b>